



Волновые явления при быстром вскипании жидкостей: физические процессы и проблемы моделирования¹

Якуш С.Е.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Введение

Фазовые переходы, сопровождающиеся значительным увеличением удельного объема вещества, могут служить источником механической энергии за счет расширения образующейся при переходе фазы. Характер этого расширения зависит от скорости фазового перехода — от изобарного при низком темпе (квазистационарный процесс) до волнового, когда расширяющееся вещество служит своего рода поршнем, вызывающим формирование волн сжатия в окружающем пространстве. Из всех возможных типов фазового перехода, наибольший интерес с этой точки зрения вызывает вскипание жидкости, для которого (вдали от критической точки) отношение плотностей в конденсированной (жидкой) и паровой фазах может составлять 2–3 порядка величины. Быстрое вскипание жидкости способно порождать ударные волны, данные явления относятся к категории физических взрывов [1].

Причины интенсивного вскипания жидкости могут быть связаны как с выделением внутренней энергии самой жидкости, так и с сообщением ей

энергии от внешнего источника, которым может служить нагретое до высокой температуры тело или другая жидкость, температура которой значительно превосходит температуру кипения более летучей жидкости. Явления первого типа характерны для аварий при хранении и транспортировке сжиженных углеводородов – аварии типа BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) [2, 3]. Второй тип физических взрывов представляет значительный интерес в связи с проблемами безопасности ядерных энергетических реакторов — паровой взрыв при взаимодействии расплава коридума с водой при плавлении активной зоны, либо воды с тяжелометаллическим теплоносителем при разрыве трубки парогенератора реактора на быстрых нейтронах.

Физические взрывы обладают значительно меньшей энергетической эффективностью по сравнению с взрывами конденсированных веществ. Причинами сильной неидеальности являются конечная скорость выделения энергии (по сравнению с практически мгновенной детонацией при химических взрывах), кроме того, выделение энергии происходит в значительно большей области, что существенно снижает плотность энергии и плотность мощности взрыва.

Моделирование физических взрывов требует привлечения моделей многофазных сред для опи-

¹Исследование выполнено в рамках госзадания ИПМех РАН (тема 123021700057-0).

сания источника, в котором происходит преобразование внутренней энергии вскипающей жидкости в механическую работу расширения, в сочетании с подходами для описания возникающих в атмосфере или жидкой среде ударных волн, успешно применяемыми в газовой динамике. В работе рассмотрены примеры моделирования физических взрывов указанных типов.

Взрывы резервуара высокого давления

Для описания быстрых газодинамических процессов при явлении типа BLEVE (взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости) плодотворной оказывается использование гомогенной равновесной модели, в которой предполагается, что паровая фаза при вскипании движется совместно с жидкой фазой, при этом процессы вскипания и конденсации протекают гораздо быстрее, чем собственно расширение облака. Это позволяет использовать предположение о термодинамическом равновесии между фазами, без необходимости рассмотрения кинетики фазового перехода. Наиболее простая модель для двухфазной среды получается в предположении об изэнтропичности процесса [2], более сложное описание включает решение уравнения для энергии двухфазной смеси и определение давления и объемной доли пара по найденной плотности и удельной внутренней энергии [3].

Как правило, считается, что явления типа BLEVE происходят со сжиженными газами, которые хранятся при температуре окружающей атмосферы в виде жидкости высокого давления (например, пропан), тогда как легкие углеводороды (метан) в этом контексте не рассматриваются (их сжижение требует криогенных температур). Однако в связи с бурным ростом во всем мире производства и перевозок сжиженного природного газа (LNG) встает вопрос о более адекватной оценке связанных с этим опасностей. В частности, при выходе из строя системы охлаждения следует ожидать резкого роста давления в резервуаре со сжиженным природным газом, что при последующем разрушении оболочки также может вызвать физический взрыв типа BLEVE. Поэтому встает вопрос о характеристиках взрывных волн и их опасности.

Для демонстрации относительной опасности взрывов от различных сжиженных углеводородов были проведены сравнительные расчеты взрыва резервуара диаметром 10 м, содержащего метан CH_4 , пропилен C_3H_6 и пропан C_3H_8 при одинаковых начальных давлениях — 10 и 30 бар. Несмотря на значительные различия в начальных термодинамических параметрах (так, при давлении 10 бар

начальная температура сжиженного метана составляет 149 К, пропана — 300 К, при 30 бар — 177 К и 350 К, соответственно), выделяющаяся при взрыве удельная энергия оказывается довольно схожей: при 10 бар для метана она составляет 21.7 кДж/кг, для пропана — 23.6 кДж/кг, а при 30 бар — 67.5 и 73.6 кДж/кг, соответственно. Более того, характерная скорость расширения, оцененная из выделяющейся энергии, при давлении 10 бар для метана составляет 208 м/с, для пропана — 217 м/с, а при 30 бар — 367 и 383 м/с, соответственно. Фактически, данные скорости определяют скорость «поршня», который толкает газ в атмосфере при разрушении резервуара и вызывает возникновение воздушной ударной волны. Расчеты, выполненные по сопряженной модели, подтвердили слабую зависимость характеристик ударных волн от вещества в резервуаре — практически все определяется начальным давлением, которое соответствует, однако, различным температурам перед взрывом.

Вскипание воды в расплаве тяжелого металла

Явления типа физического взрыва могут возникать не только в атмосфере, но и в жидкостях. Примером может служить авария с разрывом теплообменной трубки парогенератора ядерного энергетического реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем. В результате такой аварии в расплав свинца при давлении порядка 1 МПа может выбрасываться насыщенная вода из второго контура, имеющая давление порядка 20 МПа. Истечение может быть как струйным, так и одномоментным, в последнем случае капля воды высокого давления оказывается окруженной значительно более плотной средой низкого давления. Первым этапом перехода воды к новому термодинамическому состоянию является вскипание и расширение пароводяной смеси, и лишь на более позднем этапе роль начинают играть тепловые процессы, связанные с нагревом пароводяной смеси горячим расплавом.

Рассмотренная в первом разделе равновесная гомогенная модель пригодна для описания волн сжатия, распространяющихся в расплаве свинца, а также последующего расширения пароводяной смеси. При этом для внутренней задачи пригодна та же модель, что применялась для описания взрывов резервуаров высокого давления, а внешняя среда (расплав свинца) описывается баротропным уравнением Тейта $p = p_* + B[(\rho_l/\rho_*)^\gamma - 1]$, которое нашло широкое применение, например, при моделировании подводных взрывов в воде. Параметры уравнения для свинца были определены

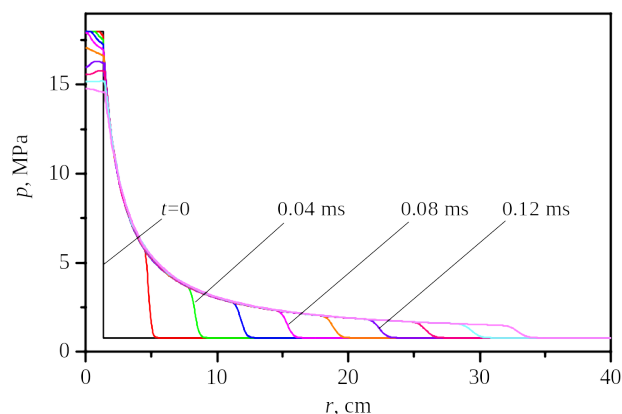


Рис. 1. Волна давления в расплаве свинца при вскипании капли воды

из его справочных свойств [6], в частности – известной начальной плотности и скорости звука в расплаве: $p_* = 0.1$ МПа, $\rho_* = 10417.4$ кг/м³, $\gamma = 12$ и $B = 2677.5$ МПа. Для воды использовались табличные данные по свойствам на линии насыщения.

Расчеты по сопряженной модели позволили получить волны давления, распространяющиеся по расплаву свинца при резком выбросе объема воды высокого давления. На Рис. 1 показаны полученные волны давления в свинце при вскипании капли воды радиусом 13 мм с начальным давлением 18 МПа. Видно, что за быстро распространяющимся фронтом давления устанавливается квазистационарное распределение давления, а снижение давления в пароводяной области происходит медленно вследствие большой инерции тяжелого металла, заполняющего внешнее пространство. Дальнейшее расширение смеси вызывает радиальное растекание свинца, оно сопровождается периодическим перерасширением и схлопыванием, аналогично

классической задаче Рэлея. Данные колебания, однако, не играют большой роли с точки зрения оценки опасности разрыва трубки парогенератора реактора, а имеют скорее теоретический интерес.

Заключение

Физические взрывы представляют собой интересное явление, в котором взаимодействуют как гидродинамические, так и теплофизические процессы. Использование гомогенной равновесной модели является весьма продуктивным, поскольку позволяет описать процессы без рассмотрения деталей на микроуровне, что сопряжено со значительными неопределенностями.

Автор выражает глубокую благодарность своим коллегам по исследованиям О.И.Мелихову и В.И.Мелихову (МЭИ).

Список литературы

- [1] Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Химические и физические взрывы. М., Полигон, 2003, 416 с.
- [2] Yakush S.E. Model for blast waves of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions // Int. J. Heat Mass Transf. 2016. V. 103. p. 173–185.
- [3] Якуш С.Е. Расчет ударных волн при взрыве резервуара высокого давления со сжиженным газом // Физика горения и взрыва. 2020. с. 83–92.
- [4] Безносков А.В., Бокова Т.А. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. Н.Н., Нижегород. гос. техн. ун-т им. П.Е. Алексеева. 2012. 536 с.
- [5] Zhang Y., Wang C., Lan Z., Wei S., Chen R., Tian W. Review of thermal-hydraulic issues and studies of lead-based fast reactors // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 120 (2020), 109625.
- [6] OECD/NEA. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies, 2015. Nuclear Energy Agency OECD 2015 Ed.